

Wiljami Anttila

TAIVUTETUN TERÄSBETONIPALKIN TAIPUMAN LASKEMINEN

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastaja: Yliopistonlehtori Olli Kerokoski

Huhtikuu 2020

TIIVISTELMÄ

Wiljami Anttila: Taivutetun teräsbetonipalkin taipuman laskeminen
Deflection calculation of reinforced concrete beam
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma
Huhtikuu 2020

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan, kuinka voidaan laskennallisesti määrittää mahdollisimman tarkka arvo yksiaukkoiselle suorakaidepoikkileikkaukselliselle teräsbetonipalkin taipumalle. Taipuman arvoa tutkitaan määrittämällä se sekä lyhyellä että pitkällä tarkasteluajalla. Samalla määritetään eri keinoja, joilla taipuman arvoa voidaan rajoittaa sekä tutkitaan, mitkä eri tekijät vaikuttavat taipuman arvon suuruuteen. Eri tekijöiden vaikutusten suuruutta tutkitaan laskelmien avulla. Tämä tutkimus tehdään jo olemassa olevan kirjallisuuden pohjalta ja tärkeimpinä lähteinä työssä ovat olleet Suomen Betoniyhdistyksen oppikirjat sekä Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu.

Taipuman laskenta suoritetaan käyttörajatilassa. Laskennassa on huomioitava käytettyjen materiaalien ominaisuudet. Betonille tärkeimmät huomioitavat ominaisuudet ovat kutistuma ja viiruma. Betonin kutistumaa esiintyy betonin kovettuessa sekä ajan mittaan betonin kuivuessa. Viiruma puolestaan on ajan mittaan kuormitetussa betonissa esiintyvä muodonmuutos. Nämä molemmat ilmiöt näkyvät betonissa täysin vasta pitkän ajan kuluttua, jonka vuoksi niiden vaikutukset taipuman arvossa nähdään kunnolla vasta, kun taipuman arvoa tarkastellaan pitkällä tarkasteluajalla.

Mikäli palkki taipuu liikaa, on tärkeää tietää, miten taipumaa voidaan rajoittaa. Yksi rajoituskeinoista on palkin esikorotus. Esikorottamisella tarkoitetaan taivuttamalla palkkia kaarevaksi ylöspäin ennen sen kuormittamista, jolloin palkin kuormitus suoristaa sitä. Muita rajoituskeinoja ovat puristusraudoituksen lisääminen, oikean betonimassan valinta, hyvä betonin jälkihoito, muottien tukirakenteiden poisto mahdollisimman myöhään sekä rakenteen muokkaaminen. Rakenteellisista muutoksista palkin jännevälin ja tehollisen korkeuden suhteen rajoittaminen on tehokkain keino rajoittaa taipumaa. Muita mahdollisia rajoituskeinoja ovat palkin poikkileikkauksen leveyden kasvattaminen, betonipeitteen paksuuden pienentäminen ja sementtityypin muuttaminen.

Avainsanat: Taipuma, palkki, teräsbetoni

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	TAIPUMATARKASTELU YLEISESTI	2
2.1	Taipumatarkastelun periaate	2
2.2	Huomioitavat materiaaliominaisuudet	2
2.2.1	Betoni	2
2.2.2	Betoniteräs	3
2.2.3	Raudoitettu betoni	4
3.	TAIPUMAAN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	5
3.1	Halkeilu	5
3.1.1	Halkeamaton tila	5
3.1.2	Haljennut tila	6
3.2	Viruma	8
3.3	Kutistuma	11
3.4	Kokonaistaipuma	13
3.5	Taipuman rajoittaminen	15
4.	ESIMERKKILASKELMAT	16
4.1	Kokonaistaipuman laskeminen	16
4.2	Herkkyystarkastelu	24
5.	TULOKSET	26
5.1	Pitkä- ja lyhytaikaisten tulosten vertailu	26
5.2	Eri tekijöiden vaikutukset	26
6.	YHTEENVETO	28
	LÄHTEET	29

LYHENTEET JA MERKINNÄT

a	taipuma
a_{cs}	kutistumasta johtuva taipuma
a_{kok}	kokonaistaipuma
a_M	kuormituksesta johtuva taipuma
A_c	poikkileikkauksen pinta-ala
A_{s1}	palkin vetopuolen terästankojen poikkipinnan kokonaisala
A_{s2}	palkin puristuspuolen terästankojen poikkipinnan kokonaisala
b	palkin leveys
d_1	palkin tehollinen korkeus
d_2	palkin puristusrautojen keskiöetäisyys palkin yläpinnasta
e	Neperin luku
$E_{c,eff}$	tehollinen kimmokerroin
E_s	raudoittamiseen käytetyn teräksen kimmokerroin
f_{ck}	betonin lieriölujuuden ominaisarvo 28 vuorokauden ikäisenä
E_{cm}	betonin kimmokertoimen keskiarvo
f_{cm}	betonin keskimääräinen puristuslujuus 28 vuorokauden ikäisenä
f_{cmo}	vakio, jonka arvo 10MPa
$f_{ct,eff}$	betonin tehollinen vetolujuus
f_{ctm}	betonin vetolujuus
h	palkin korkeus
h_0	palkin poikkileikkauksen muunneltu paksuus
I_I	halkeamattoman palkin jäyhyysmomentti
I_{II}	täysin haljenneen palkin jäyhyysmomentti
K	tuennasta ja kuormituksesta riippuva taipumakerroin
K_{cs}	momenttijakautumakerroin kutistumalle
k_h	muunnetusta paksuudesta riippuva kerroin
L	palkin jännemitta
M_{cr}	palkin halkeilumomentti
M_e	taivutusmomentti
$M_{Ek,max}$	kuormitushistorian suurin momentti
$1/r$	osittain haljenneen palkin kaarevuus
$1/r_I$	halkeamattoman palkin kaarevuus
$1/r_{II}$	täysin haljenneen palkin kaarevuus
$1/r_{cs}$	kutistuman aiheuttama kaarevuus
RH	suhteellinen kosteus
RH_0	vakio, jonka arvo 100%
S_I	halkeamattoman palkin raudoituksen staattinen momentti
S_{II}	täysin halkeilleen palkin raudoituksen staattinen momentti
t	betonin ikä tarkasteluhetkellä
t_0	betonin ikä kuormittumisen alkaessa
t_s	betonin ikä kuivumiskutistuman alkamishetkellä
u	haihtumiselle alttiin piirin pituus
W_I	palkin taivutusvastus
X_I	halkeamattoman palkin puristusvyöhykkeen korkeus
X_{II}	täysin haljenneen palkin puristusvyöhykkeen korkeus
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	betonin lujuuden vaikutuksen huomioivia kertoimia
$\alpha_{ds1}, \alpha_{ds2}$	sementin tyypistä riippuvia kertoimia
α_e	kimmokertoimien suhde
$\alpha_{e,eff}$	tehollinen kimmokerroinsuhde
β	kuormituksesta riippuva kerroin
$\beta(f_{cm})$	betonin lujuuden huomioiva kerroin

$\beta(t, t_0)$	kerroin, joka kuvaa kuormittumisen jälkeen viruman kehitystä
$\beta(t_0)$	kuormittumisen alkamisajan huomioiva kerroin
$\beta_{as}(t)$	ajasta riippuva kerroin
$\beta_{ds}(t, t_s)$	tarkasteluhetkestä ja muunnetusta paksuudesta riippuva kerroin
β_h	suhteellisesta kosteudesta ja muunnetusta poikkileikkauksen paksuudesta riippuva kerroin
β_{RH}	ympäristön suhteellisesta kosteudesta riippuva kerroin
ϵ_{ca}	sisäinen kutistuma
$\epsilon_{ca}(\infty)$	betonin puristuslujuudesta riippuva arvo
ϵ_{cd}	kuivumiskutistuma
$\epsilon_{cd,0}$	nimellinen kuivumiskutistuma
ϵ_{cs}	kokonaiskutistuma
ζ	palkin halkeiluaste
ρ_1	geometrinen raudoitussuhde
$\varphi(t, t_0)$	virumaluku
φ_0	nimellinen virumaluku
φ_{RH}	suhteellisen kosteuden huomioiva kerroin

1. JOHDANTO

Palkit ovat yleisiä talonrakentamisen kantavia rakenneosia. Niiden päätehtävänä on kantella siihen tukeutuvia yläpuolisia rakenteita, kuten väli- ja yläpohjaa, kattoa, ja siirtää näistä aiheutuvia pystykuormia pilareille tai muille pystyrakenteille. Palkeissa kuormitus vaikuttaa yleisesti palkin pituusakselia vastaan kohtisuoraan, minkä seurauksena siihen syntyy pääasiassa taivutus- ja leikkausrasituksia (BY211 2013, s. 81). Pystykuormista aiheutuvat taivutusrasitukset aiheuttavat palkeissa taipumaa.

Rakennesuunnittelijan tulee laskea palkin taipuma palkkia mitoittaessa. Liiallisen taipuman seurauksena itse palkki tai yläpuoliset rakenteet eivät toimi tarkoituksenmukaisesti. Taipuman laskemisen syynä voivat myös olla ulkonäköseikat, jonka seurauksena taipuman suuruudelle halutaan arvio. Tämän vuoksi taipuman laskeminen on tärkeää rakennesuunnittelun kannalta.

Tutkimuksen päätavoitteena on selvittää, kuinka taivutetun teräsbetonipalkin taipumalle voidaan laskea mahdollisimman tarkka arvo. Tämän lisäksi tutkitaan, kuinka sitä voidaan rajoittaa ja kuinka eri tekijät vaikuttavat taipumaan. Vaikuttavien tekijöiden suuruutta tutkitaan esimerkkilaskelmien avulla. Työn tavoitteena on myös antaa teräsbetonipalkin taipuman laskemisesta ja sen rajoittamisesta lisätietoa aiheesta kiinnostuneille.

Kandidaatintyö suoritetaan kirjallisuustutkimuksena. Tutkimuksessa käytetään jo olemassa olevia selvityksiä, joista kootaan yhtenäinen ja perusteellinen paketti taipuman laskemisesta. Kerätyillä tiedoilla tehdään laskentaesimerkkejä, joiden avulla tutkitaan eri vaikuttavien tekijöiden vaikutuksen suuruutta taipumaan.

Tutkimuksessa ja sen laskuesimerkeissä keskitytään ainoastaan yksiaukkoisiin suora-kaidepalkkeihin, joiden taipumaa tutkitaan sekä lyhyen että pitkän tarkastelun jälkeen. Tutkimuksessa ei käsitellä, kuinka laskenta tapahtuu muunlaisissa palkeissa tai muissa tapauksissa.

Kandidaatintyön toisessa luvussa käsitellään taipumatarkastelua yleisesti sekä taipuman kannalta betonin ja teräksen tärkeimpiä ominaisuuksia. Tämän jälkeen alkaa työn teoriaosuus, jossa johdetaan taipuman laskemiseen tarvittavat kaavat ja käsitellään eri keinoja taipuman rajoittamiseen. Näiden tietojen avulla neljännessä luvussa suoritetaan esimerkkilaskuja, joiden tuloksia käsitellään ja vertaillaan työn viidennessä luvussa. Lopussa käsitellyistä asioista muodostetaan yhteenveto.

2. TAIPUMATARKASTELU YLEISESTI

2.1 Taipumatarkastelun periaate

Taipuman laskenta suoritetaan mitoituksen loppuvaiheilla käyttörajatilassa. Sen tarkoituksena on varmistaa, ettei palkin liiallisesta taipumasta seuraa pinnoitevaurioita tai muita haittavaikutuksia palkille tai sen yläpuolisille rakenteille.

Taipumaa voidaan tarkastella eri ajanhetkillä. Sen arvoa voidaan tutkia heti, kun palkkia aletaan kuormittamaan tai sen arvon suuruutta voidaan tarkastella vuosien kuormituksen jälkeen. Monet rakenteet suunnitellaan 50 vuoden käyttöiälle, siksi taipumaa tarkastellaan monesti pitkällä aikavälillä.

2.2 Huomioitavat materiaaliominaisuudet

Valmiit betonirakenteet muodostuvat useimmiten betonista ja teräksestä. Tässä aluvuossa käsitellään taipuman laskennan kannalta tärkeimmät materiaaliominaisuudet betonilta ja teräkseltä.

2.2.1 Betoni

Betoni on paljon käytetty rakennusmateriaali sen hyvien ominaisuuksien vuoksi. Se on hyvin edullinen, palon- ja säänkestävä sekä hyvin ääntä eristävä materiaali. Betonin suosiota parantaa myös sen muokattavuus ja työstettävyyys. Siitä saadaan melkein kaikki kaikenlaisia ja -muotoisia rakenteita, koska valettaessa se kopioi muottinsa muodon hyvin tarkasti. Kovettunutta betonia voidaan vielä viimeistellä usein eri tavoin, kuten hiomalla tai hiekkapuhaltamalla. (Betoniteollisuus 2018a)

Betonin yksi tärkeistä taipuman laskennassa huomioitavista ominaisuuksista on viruma. Viruma on kuormitetussa betonissa esiintyvä muodonmuutos, joka tapahtuu ajan kuluessa. Pääasiassa se ilmenee taipumana, jonka vuoksi sitä pidetään haitallisena. Tärkeimpiä virumaan vaikuttavia tekijöitä ovat betonin ikä ja lujuusluokka, betonin ympäristön kosteus ja betonirakenteen mitat. (BY211 2013, s. 43)

Toinen tärkeistä huomioitavista ominaisuuksista on kutistuma, jota tapahtuu, kun betoni kuivuu ja kovettuu. Se johtuu kahdesta ilmiöstä, jotka ovat kuivumisen ja hydrataatioreaktion aiheuttamat tilavuuden muutokset. Niiden seurauksena betonissa tapahtuu kuivumiskutistumaa sekä sisäistä kutistumaa. Kutistuma aiheuttaa betonirakenteisiin halkeiluriskiä ja kaarevuutta. (BY211 2013, s. 47)

Kuivumiskutistumassa betonin huokosissa oleva vesi haihtuu, jolloin betonin kiinteät osat lähenevät toisiaan pienentäen betonin tilavuutta. Näin ollen kutistumaa tapahtuu hiitaasti sitä mukaan, kun vettä haihtuu betonin huokosista. Kuivumiskutistuman suuruuteen vaikuttavat tärkeimmät tekijät ovat betonin vesisementtisuhde, rakenteen mitat ja ympäristön kosteustila. (BY211 2013, s. 47) Sen suuruutta laskettaessa nämä asiat tulee ottaa huomioon.

Betonissa tapahtuu myös sisäistä kutistumaa, koska sementin hydrataatiotuotteiden tilavuus on muita reaktioon osallistuvien tuotteiden tilavuutta pienempi (BY211 2013, s. 47). Näin ollen, mitä suurempi määrä sementtiä on betonissa, sitä suurempi on kutistuma. Toisin kuin kuivumiskutistuma, sisäinen kutistuma tapahtuu rakenteessa hyvin nopeasti ja sen arvot ovat pienempiä kuin kuivumiskutistuman (BY211 2013, s. 47).

Betonin tärkeimpänä ominaisuutena rakentamisessa voidaan kuitenkin pitää sen puristuslujuutta, jonka mukaan se luokitellaan eri lujuusluokkiin. Lujuusluokkien perusteella saadaan suunnittelussa tarvittavat muut mekaaniset ominaisuudet. (BY211 2013, s. 33) Eri betonityyppien lujuusominaisuudet ovat taulukossa 1.

Taulukko 1. Betonin lujuusominaisuudet (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 30).

Betonin lujuusluokka														
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck, cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0
$f_{ctk, 0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5
$f_{ctk, 0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6
E_{cm} (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44

Betonin yhtenä heikkoutena voidaan pitää vetolujuutta. Vetolujuus on vain noin 10 % betonin puristuslujuudesta, minkä vuoksi se kestää huonosti taipumasta johtuvaa vetoa ja alkaa halkeilla (Betoniteollisuus 2018b). Halkeilun seurauksena betoni menettää vetolujuutensa kokonaan, minkä vuoksi se tuleeekin raudoittaa betoniteräksillä.

2.2.2 Betoniteräs

Betonin raudoittamiseen käytetyt betoniteräokset ovat terästankoja, joiden pintaan on valssattu harjoja parantamaan teräksen tartuntaa betoniin. Terästankojen paksuudet vaihtelevat 5 mm:stä 40 mm:iin. Kuitenkin palkeissa tankojen paksuudet ovat yleensä 12–32 mm. (BY211 2013, s. 48–54)

Raudoittamiseen käytetyt betoniteräket kestävät hyvin niin vetoa kuin puristusta, ja niiden arvoja voidaankin pitää lähes yhtä suurina (BY202 1986, s. 20). Betoniteräksen lujuus määritellään myötörajana tai 0,2 % venymärajana, jota kutsutaan teräsbetonin myötölujuudeksi. Myötöraja saadaan määritettyä mittaamalla jännityksen suuruus silloin, kun teräksessä tapahtuu pysyvää muodonmuutosta. 0,2 % venymäraja määritetään puolestaan mittaamalla jännityksen suuruus, jolla saadaan teräksessä 0,2 % pysyvä venymä. Myötölujuuksien arvot ovat 400–700 MPa. Teräs on myös hyvin sitkeä materiaali, jolloin se ei murru helposti, vaan enemmänkin taipuu ja venyy. (BY211 2013, s. 49)

Teräs on kuitenkin herkkä lämpötilan muutokselle. Esimerkiksi lämpötilan noustessa tulipalotilanteessa teräksen lujuusominaisuudet pienenevät. Teräs on myös suojaamattomana herkkä korroosiolle, minkä vuoksi se ei sellaisenaan sovi kaikkiin ympäristöolosuhteisiin.

2.2.3 Raudoitettu betoni

Betonin ja teräksen erilaisten ominaisuuksien vuoksi betonia ja terästä yhdistetään rakenteissa ja niiden yhdistelmäateriaalia kutsutaan teräsbetoniksi. Siinä molempien materiaalien hyviä ominaisuuksia käytetään hyväksi. Betoni antaa teräsbetonille hyvän puristuslujuuden, ja teräs puolestaan lisää teräsbetonin veto- ja taivutuskestävyyttä. Betonin raudoittaminen myös pienentää kutistumismuodonmuutosta, jolloin betonin halkeamat jäävät pienemmiksi. Betoni myös suojaa terästä ruostumiselta ja muulta kulumiselta. Betoni antaa teräkselle myös suojaa lämpötilan muutokselle, jolloin se ei menetä puristus- ja vetolujuuttaan. (BY211 2013, s. 47–54)

Teräsbetonin yhteistoiminta kuitenkin vaatii, että jännitykset ja muodonmuutokset siirtyvät betonin ja raudoituksen välisen tartunnan vaikutuksesta (BY211 2013, s. 54). Betonin ja teräksen pituuden lämpötilakertoimet ovat myös melkein samat, joten teräsbetoni kestää hyvin lämpötilan muutoksia.

3. TAIPUMAAN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

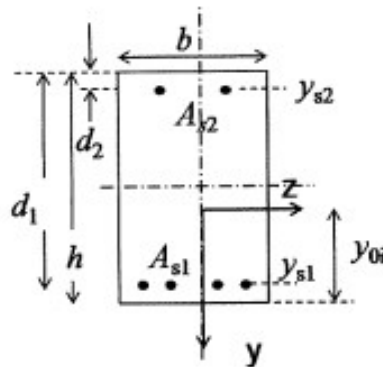
3.1 Halkeilu

Betonirakenteissa esiintyy halkeilua, kun rakenteen vetojännitys ylittää betonin vetolujuuden. Vetojännitystä rakenteeseen voivat aiheuttaa ulkoiset kuormitukset tai sisäiset pakkovoimat. Pakkovoimia syntyy betonin lämpöliikkeiden sekä kutistuman johdosta, kun muodonmuutosten syntymistä on rajoitettu. (BY211 2013, s. 208)

Teräsbetonirakenteissa halkeaman muodostuminen jakaa rakenteen tarkastelun kahteen eri tilaan, halkeamattoman ja haljenneen tilan tarkasteluun. Molempien tilojen tarkastelussa käytetään omia kaavoja.

3.1.1 Halkeamaton tila

Halkeamattomassa tilassa palkin vetojännitys on pienempi kuin betonin vetolujuus. Tässä tilassa rakenne käsitellään lineaarisen kimmoteorian mukaan ja sen poikkileikkaussuureissa huomioidaan palkin rauditus (BY211 2013, s. 203). Halkeamattoman poikkileikkauksen suuret on määritelty kuvan 1 mukaan.



Kuva 1. Halkeamattoman poikkileikkauksen määrittely (BY211 2013, s.204).

Taipumaa laskiessa tulee määrittää palkin halkeilumomentti (M_{cr}), jonka ylittyessä palkkiin muodostuu halkeamia. Se saadaan laskettua kertomalla betonin vetolujuuden tehollinen arvo ($f_{ct,eff}$) palkin taivutusvastuksella (W_I)

$$M_{cr} = f_{ct,eff} \cdot W_I. \quad (1)$$

Betonin vetolujuuden tehollisena arvona voidaan käyttää betonin vetolujuutta f_{ctm} , jolle saadaan arvo taulukosta 1. Palkin taivutusvastus voidaan laskea palkin jäyhyysmomentin, korkeuden ja puristusvyöhykkeen korkeuden avulla

$$W_I = \frac{I_I}{h - X_I}, \quad (2)$$

missä I_I on palkin jäyhyysmomentti, h on palkin korkeus ja X_I on puristusvyöhykkeen korkeus. (BY211 2013, s. 205–216)

Suorakaidepoikkileikkaukselle puristusvyöhykkeen korkeus ja jäyhyysmomentti voidaan laskea seuraavilla kaavoilla:

$$X_I = \frac{\frac{bh^2}{2} + (\alpha_e - 1)(A_{s1}d_1 + A_{s2}d_2)}{bh + (\alpha_e - 1)(A_{s1} + A_{s2})} \quad (3)$$

$$I_I = \frac{bh^3}{12} + bh\left(\frac{h}{2} - X_I\right)^2 + (\alpha_e - 1)[A_{s1}(d_1 - X_I)^2 + A_{s2}(d_2 - X_I)^2]. \quad (4)$$

Kaavoissa (3) ja (4) α_e on kimmokertoimien suhde, joka määritellään myöhemmin, A_{s1} on palkin alapinnan terästankojen poikkipinnan kokonaisala ja A_{s2} on puolestaan yläpinnan terästen poikkipinnan kokonaisala. (BY211 2013, s. 205) Kaavojen suuret b , d_1 ja d_2 näkyvät kuvassa 1.

Myöhempiä laskuja varten tulee vielä selvittää halkeilemattoman palkin raudoituksen staattinen momentti (S_I), joka voidaan laskea kaavalla

$$S_I = A_{s1}(d_1 - X_I) + A_{s2}(d_2 - X_I). \quad (5)$$

Staattista momenttia tarvitaan kutistuman kaarevuuden laskemiseen. (BY211 2013, s. 231)

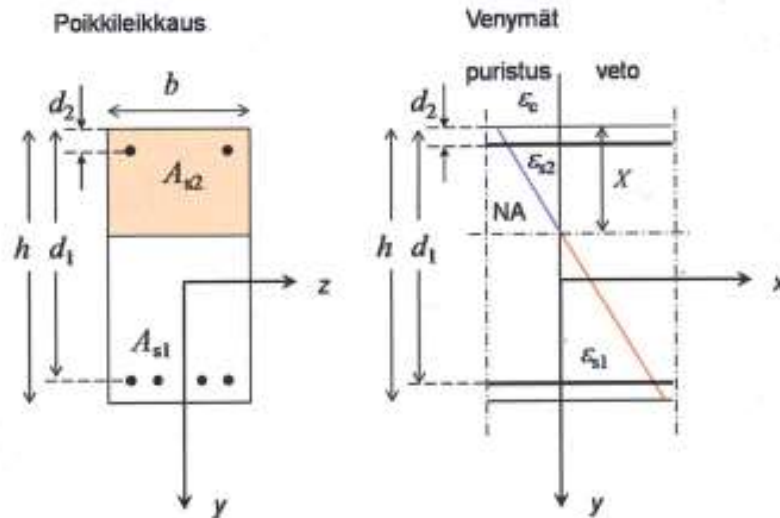
Palkin jäyhyysmomenteja ja puristusvyöhykkeen korkeuksia tarvitaan, kun lasketaan kuormituksesta johtuvan kaarevuuden suuruutta. Halkeamattoman tilan kaarevuus ($\frac{1}{r_I}$) saadaan laskettua kaavalla:

$$\frac{1}{r_I} = \frac{M_E}{E_{cm} \cdot I_I}, \quad (6)$$

missä E_{cm} on betonin kimmokertoimen keskiarvo ja M_E on taivutusmomentti, jolle taipuma lasketaan. (BY211 2013, s. 229)

3.1.2 Haljennut tila

Haljenneessa tilassa muodonmuutoksia ja jännityksiä tarkastellaan halkeaman kohdalla. Sen poikkileikkauksen suuret on määritetty kuvan 2 mukaan.



Kuva 2. Haljenneen poikkileikkauksen suuret (BY211 2013, s. 206).

Haljenneessa teräsbetonipalkissa tulee huomioida sen koko käyttöiän aikana tuleva suurin kuormitus ja tämä ”kuormitushistoria” huomioidaan laskemalla palkin halkeiluaste (ζ). Halkeiluaste voidaan määrittää seuraavasti:

$$\zeta = 1 - \beta \left(\frac{M_{cr}}{M_{Ek,max}} \right)^2, \quad (7)$$

missä β on kerroin, joka huomioi kuormituksen keston ja toistuvuuden. Yksittäisille lyhytaikaisille kuormille $\beta = 1,0$ ja pitkäaikaisille tai toistuville kuormille puolestaan sen arvo on $\beta = 0,5$. Kaavan (7) $M_{Ek,max}$ on kuormitushistorian suurin momentti ja tavallisessa mitoitustilanteessa se lasketaan ominaiskuormien yhdistelmän mukaan. (BY211 2013, s. 227–228) Halkeamattomille poikkileikkauksille halkeiluaste $\zeta = 0$.

Suomen Betoniyhdistyksen (2013, s. 205) mukaan haljenneen teräsbetonipalkin, missä on puristusraudoitus puristusvyöhykkeen korkeus (X_{II}) saadaan laskettua kaavalla

$$X_{II} = \frac{1}{b} \{ [(\alpha_e A_{s1} + (\alpha_e - 1) A_{s2})^2 + 2b(\alpha_e d_1 A_{s1} + (\alpha_e - 1) d_1 A_{s2})]^{0,5} - (\alpha_e A_{s1} + (\alpha_e - 1) A_{s2}) \}. \quad (8)$$

Puristuspinnan korkeus saadaan määritettyä seuraavasti, kun palkissa ei ole puristusraudoitusta:

$$X_{II} = \alpha_e \cdot d_1 \cdot \rho_1 \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{\alpha_e \cdot \rho_1}} \right). \quad (9)$$

Kaavan (9) ρ_1 on geometrinen raudoitussuhde, ja se saadaan laskettua kaavalla

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b \cdot d}, \quad (10)$$

missä d on palkin tehollinen korkeus (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 69).

Suomen Betoniyhdistyksen (2013, s. 206) mukaan haljenneen poikkileikkauksen jäyhyysmomentti saadaan laskettua kaavalla

$$I_{II} = \frac{b \cdot X_{II}^3}{3} + \alpha_e \cdot A_{s1} (d_1 - X_{II})^2 + (\alpha_e - 1) A_{s2} (d_2 - X_{II})^2. \quad (11)$$

Lasketaan myös haljenneen poikkileikkauksen raudoituksen staattinen momentti, joka saadaan laskettua kaavan (5) tavoin, mutta käyttämällä haljenneen poikkileikkauksen puristusvyöhykkeen korkeutta

$$S_{II} = A_{s1} (d_1 - X_{II}) + A_{s2} (d_2 - X_{II}). \quad (12)$$

Staatinn momentti on yhtä suuri neutraaliakselin molemmilla puolilla. Täysin halkeilleen palkin poikkileikkauksen jäyhyysmomentin avulla saadaan laskettua täysin halkeilleen tilan kaarevuus ($\frac{1}{r_{II}}$)

$$\frac{1}{r_{II}} = \frac{M_E}{E_{cm} \cdot I_{II}}. \quad (13)$$

Jos taipumaa tarkastellaan pitkällä aikavälillä, tulee kaavojen (6) ja (13) betonin kimmokerroimen keskiarvon tilalla käyttää tehollista kimmokerrointa ($E_{c,eff}$), joka huomioi betonin viruman. (BY211 2013, s. 229–231) Tehollisen kimmokerroimen laskeminen määritellään myöhemmin.

Halkeilemattoman ja täysin haljenneen poikkileikkauksien kaarevuuksilla voidaan laskea osittain halkeilleen tilan kaarevuus halkeiluasteen avulla:

$$\frac{1}{r} = \zeta \cdot \frac{1}{r_{II}} + (1 - \zeta) \frac{1}{r_I}. \quad (14)$$

Näillä eri tilojen kaarevuuksien avulla saadaan laskettua palkin kuormituksesta johtuva taipuma. (BY211 2013, s. 229)

3.2 Viruma

Viruma on siis kuormitetussa betonissa esiintyvä muodonmuutos, joka tapahtuu ajan kuluessa. Viruman vaikutuksen huomioimiseksi täytyy määrittää virumaluku $\varphi(t, t_0)$, joka saadaan laskettua kaavalla

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t_0), \quad (15)$$

missä φ_0 on nimellinen virumaluku ja $\beta_c(t, t_0)$ on kerroin, joka kuvaa kuormittumisen jälkeen viruman kehitystä (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 197). Nimellisen virumaluvun likiarvo saadaan kaavalla

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0), \quad (16)$$

missä φ_{RH} on kerroin, joka huomioi suhteellisen kosteuden vaikutus nimelliseen virumaan, $\beta(f_{cm})$ on kerroin, joka huomioi betonin lujuuden vaikutuksen ja $\beta(t_0)$ on kerroin, joka huomioi betonin kuormittumisen alkamisajan vaikutuksen. (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 197)

Kertoimen φ_{RH} laskentatapa riippuu betonin puristuslujuudesta. Sen laskenta tapahtuu kaavalla

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH/100}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \quad \text{kun } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa}, \quad (17)$$

tai

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - RH/100}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \cdot \alpha_1 \right] \cdot \alpha_2 \quad \text{kun } f_{cm} > 35 \text{ MPa}. \quad (18)$$

Kaavan (18) α_1 ja α_2 ovat kertoimia, joilla huomioidaan betonin lujuuden vaikutus, ja ne saadaan määritettyä kaavoilla

$$\alpha_1 = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,7} \quad (19)$$

ja

$$\alpha_2 = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,2}. \quad (20)$$

Kaavoissa (17) ja (18) RH on suhteellinen kosteus prosentteina ja h_0 on rakenteen poikkileikkauksen muunnettu paksuus ja se saadaan laskettua kaavalla

$$h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{u}, \quad (21)$$

missä A_c on poikkileikkauksen pinta-ala ja u on haihtumiselle alttiin piirin pituus poikkileikkauksessa. (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 197–198) Kerroin $\beta(f_{cm})$ puolestaan saadaan laskettua kaavalla

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}}. \quad (22)$$

Symboli f_{cm} tarkoittaa betonin keskimääräistä puristuslujuutta sen ollessa 28 vuorokauden ikäinen. Betonin kuormittumisen alkamisajan kerroin määritetään seuraavasti:

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + t_0^{0,20}}, \quad (23)$$

missä t_0 on betonin ikä vuorokausina kuormittumisen alkaessa. Viruman laskemiseen tarvittavalle kertoimelle $\beta_c(t, t_0)$ voidaan laskea likiarvo kaavalla

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{(t - t_0)}{(\beta_h + t - t_0)} \right]^{0,3}, \quad (24)$$

missä t on betonin ikä tarkasteluhetkellä vuorokausina ja β_h on myös suhteellisesta kosteudesta ja poikkileikkauksen muunnetusta paksuudesta riippuva kerroin. (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 197–198) Sen laskentatapa on myös riippuvainen betonin puristuslujuudesta. Se lasketaan kaavalla

$$\beta_H = 1,5[1 + (0,012 \cdot RH)^{18}]h_0 + 250 \leq 1500, \quad (25)$$

$$\text{kun } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa}$$

tai

$$\beta_H = 1,5[1 + (0,012 \cdot RH)^{18}]h_0 + 250 \cdot \alpha_3 \leq 1500 \cdot \alpha_3, \quad (26)$$

$$\text{kun } f_{cm} > 35 \text{ MPa}.$$

Kaavan (26) α_3 on myös betonin lujuuden huomioiva kerroin ja se voidaan laskea kaavalla

$$\alpha_3 = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,5}. \quad (27)$$

Kun virumaluku on saatu määritettyä, otetaan sen likimääräinen vaikutus huomioon käyttämällä kimmokertoimen arvona tehollista kimmokerrointa. Suomen betoniyhdistyksen (2013, s. 45) mukaan se voidaan laskea kaavalla

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(t, t_0)}. \quad (28)$$

Betonin kimmokertoimen keskiarvo saadaan puolestaan määritettyä seuraavasti:

$$E_{cm} = 22GPa \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10MPa} \right)^{0,3} \quad (29)$$

Betonin keskimääräiselle puristuslujuudelle saadaan arvo taulukosta 1.

3.3 Kutistuma

Vanhetessa betoni kuivuu ja kovettuu, jonka seurauksena se kutistuu. Rakenteessa tapahtuva kokonaiskutistuma saadaan kuivumiskutistuman ja sisäisen kutistuman summana

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}, \quad (30)$$

missä ε_{cs} on kokonaiskutistuma, ε_{cd} on kuivumiskutistuma ja ε_{ca} on sisäinen kutistuma. (BY211 2013, s. 47)

Kuivumiskutistumalle voidaan laskea arvo eri tarkasteluhetkillä kaavalla

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0}, \quad (31)$$

missä k_h on kerroin, joka riippuu muunnetusta paksuudesta, $\beta_{ds}(t, t_s)$ on kerroin, joka on riippuvainen tarkasteluhetkestä sekä poikkileikkauksen muunnetusta paksuudesta, ja $\varepsilon_{cd,0}$ on nimellisen kuivumiskutistuman arvo (SFS-EN 1992-1-1 2015, s.33). Kertoimelle k_h saadaan arvot taulukosta 2.

Taulukko 2. Kertoimen k_h arvoja (SFS-EN 1992-1-1, s. 33).

h_0	k_h
100	1,0
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70

Kerroin $\beta_{ds}(t, t_s)$ voidaan puolestaan laskea kaavalla

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0,04 \cdot \sqrt{h_0^3}}, \quad (32)$$

missä t_s on betonin ikä vuorokausina kuivumiskutistumisen alkamishetkellä. Sen alkamishetkeksi tavallisesti katsotaan hetki, jolloin betonin jälkihoito päättyy. (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 34)

Nimellisen kuivumiskutistuman arvo saadaan kaavasta

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot e^{-\alpha_{ds} \cdot \frac{f_{cm}}{f_{cmo}}} \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH}, \quad (33) \right.$$

missä α_{ds1} ja α_{ds2} ovat sementtityypistä riippuvia kertoimia. Eurokoodissa esitetyt arvot niille on koottu taulukkoon 3. Kaavan (33) e tarkoittaa Neperin lukua ja f_{cmo} on vakio, jonka arvo on 10 MPa.

Taulukko 3. Sementtityypistä riippuvien kertoimien arvot.

Sementtityyppi	α_{ds1}	α_{ds2}	α	s
S	3	0,13	-1	0,38
N	4	0,12	0	0,25
R	6	0,11	1	0,2

Kerroin β_{RH} on ympäristön suhteellisesta kosteudesta riippuva kerroin, joka saadaan laskettua kaavalla

$$\beta_{RH} = 1,55 \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right], \quad (34)$$

missä RH_0 on vakio ja sen arvo on 100 %.

Betonin sisäisen kutistuman arvo eri tarkasteluhetkille saadaan puolestaan laskettua kaavalla

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty), \quad (35)$$

missä $\varepsilon_{ca}(\infty)$ on betonin puristuslujuuden ominaisarvosta riippuvainen arvo, ja se saadaan määritettyä kaavalla

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}. \quad (36)$$

Kerroin $\beta_{as}(t)$ on ajasta riippuva, ja se voidaan laskea kaavalla

$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{-0,2 \cdot t^{0,5}}. \quad (37)$$

Summaamalla $\varepsilon_{ca}(t)$ ja $\varepsilon_{cd}(t)$ yhteen saadaan kutistumaa vastaava muodonmuutos ($\varepsilon_{cs}(t)$), jota tarvitaan kutistuman aiheuttamaa kaarevuutta laskettaessa. (SFS-EN 1992-1-1 2015, s.34) Kutistuman aiheuttama kaarevuus saadaan laskettua seuraavasti:

$$\frac{1}{r_{cs}} = \varepsilon_{cs} \cdot \alpha_{e,eff} \cdot \frac{S}{I}, \quad (38)$$

missä $\alpha_{e,eff}$ on tehollinen kimmokerroinsuhde, S on raudoituksen staattinen momentti ja I on palkin poikkileikkauksen jäyhyysmomentti (BY211 2013, s. 231). Tehollinen kimmokerroinsuhde ($\alpha_{e,eff}$) saadaan palkissa raudoittamiseen käytetyn teräksen ja betonin tehollisen kimmokertoimen suhteena

$$\alpha_{e,eff} = \frac{E_s}{E_{c,eff}}. \quad (39)$$

Kimmokerroinsuhde (α_e) saadaan puolestaan laskettua, kun käytetään betonin tehollisen kimmokertoimen tilalla betonin kimmokertoimen keskiarvoa

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cm}}. \quad (40)$$

Tehollista kimmokerroinsuhdetta käytetään, kun halutaan tarkastella palkin pitkäaikaista taipumaa. (BY211 2013, s. 204)

3.4 Kokonaistaipuma

Palkin kokonaistaipuman laskeminen voidaan jakaa osiin. Kokonaistaipuma muodostuu aiemmin määritettyjen kutistuman, kuormituksen ja viruman aiheuttamista palkin kaarevuuksista. Kaarevuuksista aiheutuvat taipumat saadaan laskettua samalla taipuman peruskaavalla

$$a = K \cdot L^2 \cdot \frac{1}{r}, \quad (41)$$

missä L on palkin jännemitta, $\frac{1}{r}$ on palkin kaarevuus ja K on palkin tuennasta ja kuormituksesta riippuva taipumakerroin (BY211 2013, s. 226). Sen arvoja on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Taipumakerroin K arvoja (BY211 2013, s. 227).

Kuormitus	Taivutusmomentti	Kerroin K
		$\frac{1}{8} = 0,125$
		$\frac{1}{9\sqrt{3}} = 0,0642$
		$\frac{1}{3}(a-a^2)$
		$0,125 - \frac{a^2}{6}$
		$\frac{5}{48} = 0,104$
		0,102
		$\frac{5}{48} \left(1 + \frac{M_A + M_B}{M_C} \right)$ Momentit sijoitetaan merkkisääntöjen mukaan (+ tai -)

Kutistumasta johtuva taipuma (a_{cs}) saadaan laskettua kaavalla

$$a_{cs} = K_{cs} \cdot L^2 \cdot \frac{1}{r_{cs}}, \quad (42)$$

missä K_{cs} on momenttijakautumakerroin kutistumalle ja sen arvo $K_{cs} = 0,125$ (BY211 2013, s. 231). Kaavan (40) raudoituksen staattisen momentin ja palkin jäyhyysmomentin suhde saadaan määritettyä seuraavasti halkeamattoman ja täysin haljenneen tilan yhdistelmänä:

$$\frac{S}{I} = \zeta \cdot \frac{S_{II}}{I_{II}} + (1 - \zeta) \frac{S_I}{I_I}. \quad (43)$$

Palkin kuormituksesta johtuva taipuma (a_M) saadaan laskettua taipuman peruskaavalla

$$a_M = K \cdot L^2 \cdot \frac{1}{r}, \quad (44)$$

missä $\frac{1}{r}$ on halkeiluosiassa määritetyn osittain halkeilleen poikkileikkauksen kaarevuus (BY211 2013, s. 228).

Palkin kokonaistaipuma (a_{kok}) saadaan kutistumasta ja kuormituksesta johtuvan taipuman summana

$$a_{kok} = a_M + a_{cs}. \quad (45)$$

Kutistumasta aiheutuvaa taipumaa esiintyy palkeissa vain pitkällä aikavälillä.

3.5 Taipuman rajoittaminen

Rakenneosan taipuman arvo voi joskus tulla liian suureksi, jolloin sitä täytyy rajoittaa. Eurokoodin 1992-1-1 (2015, s. 125) mukaan yleinen taipuman raja on seuraava: ”Rakennosan tai rakenteen siirtymätila ei saa olla sellainen, että se haittaa rakennosan tai rakenteen tarkoituksenmukaista toimintaa tai ulkonäköä.” Samassa Eurokoodissa myös suositellaan, että rakentamisen jälkeisen taipuman ylärajan tulisi olla palkin jännemitta jaettuna luvulla 250 pitkäaikaiskuormien vallittaessa. Jos rakenteeseen liittyvät muut rakennosat tai laitteet ovat herkkiä taipumalle, taipuman ylärajan tulisi olla jännemitta jaettuna luvulla 500.

Rakenteen vaakatason alapuolista taipumaa voidaan rajoittaa esikorrottamalla taipuvaa rakennetta. Esikorrottamisella tarkoitetaan rakenteen taivuttamista ylöspäin kaarevaksi ennen kuormitusta, jolloin rakenteeseen kohdistuvasta kuormituksesta syntyvä taipuma suoristaa rakennetta. Liiallinen esikoroitus kuitenkin voi jättää rakenteen kaarevaksi ylöspäin,

minkä vuoksi esikorotuksen yläraja-arvo on jännemitta jaettuna luvulla 250 (SFS-EN 1992-1-1, s. 126).

Muita taipuman rajoituskeinoja ovat

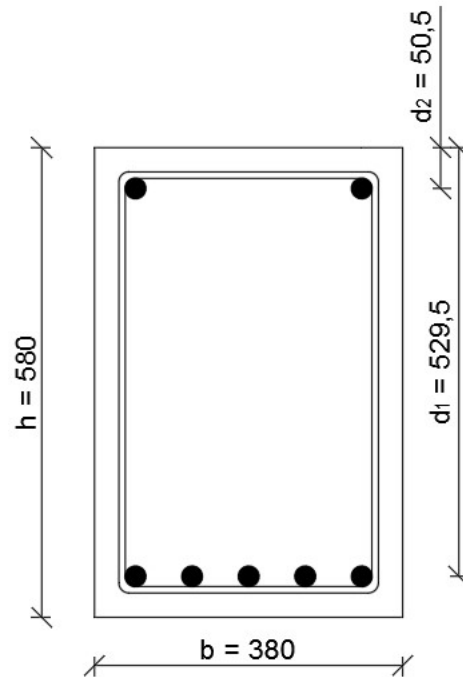
- puristusraudoituksen lisääminen, jolla saadaan pienennettyä jälkitaipumia (BY211 2013, s. 214)
- oikean betonimassan valinta, jolla saadaan oikeat lujuusominaisuudet eri rakenteille (Rakennusteollisuus RTT ry 2012, s. 1)
- hyvä jälkihoito, jolla voidaan ehkäistä halkeilua ja turvata betonin vetolujuuden kehittyminen (Betoniteollisuus 2018c)
- muottien tukirakenteiden poisto mahdollisimman myöhään, jolla voidaan pienentää jälkitaipumaa (BY202 1986, s. 214).

Taipumaa voidaan myös rajoittaa muuttamalla rakennetta. Yksi tapa tähän on rajoittaa rakenteen jännemittaan ja tehollisen korkeuden suhdetta (BY211 2013, s. 223–226).

4. ESIMERKKILASKELMAT

4.1 Kokonaistaipuman laskeminen

Tässä esimerkki laskussa lasketaan palkin kokonaistaipuma pitkän- ja lyhyen tarkastelun jälkeen. Teräsbetonipalkin poikkileikkauksen suuret näkyvät kuvassa 3.



Kuva 3. Palkin poikkileikkaus.

Kootaan vielä tiedetyt lähtöarvot, ensin palkin suuret:

- palkin korkeus: $h = 580\text{mm}$
- palkin leveys: $b = 380\text{mm}$
- palkin jännemitta: $L = 5,0\text{m}$
- raudoituksen betonipeite: $c = 30\text{mm}$
- betonin lujuusluokka: C30/37
- teholliset korkeudet: $d_1 = 529,5\text{mm}$, $d_2 = 50,5\text{mm}$
- vetoraidoitus: 5T25
- puristusraidoitus: 2T25
- haat: T8 k200
- vetoraidoituksen pinta-ala: $A_{s1} = 5 \cdot \pi \cdot (12,5\text{mm})^2 = 2454,4\text{mm}^2$
- puristusraidoituksen pinta-ala: $A_{s2} = 2 \cdot \pi \cdot (12,5\text{mm})^2 = 981,7\text{mm}^2$

Materiaaliominaisuudet:

- sementin tyyppi: N
- betonin lujuusluokka: C30/37
- raudoitus: B500B
- betonin lieriölujuuden keskiarvo taulukosta 1: $f_{cm} = 38 \text{ MPa}$
- teräksen kimmokerroin: $E_s = 200 \text{ GPa}$
- betonin vetolujuus: $f_{ctm} = 2,9 \text{ MPa}$
- betonin lieriölujuuden ominaisarvo 28 vuorokauden ikäisenä taulukosta 1: $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$

Palkkia kuormittaa tasainen kuorma:

- pysyvä kuorma: $g_k = 45 \text{ kN/m}$
- muuttuva kuorma: $q_k = 30 \text{ kN/m}$
- muuttuvan kuorman pysyvä osuus: $\psi_2 = 0,3$.

Virumaluvun määrittäminen:

Määritetään ensin palkin virumaluku. Virumaluvun tarkasteluhetkenä on 50 vuotta valamisen jälkeen, joka on vuorokausina 18262. Kuormituksen alkamishetkeksi tiedetään 14 vuorokautta. Määritetään aluksi betonin lujuuden huomioivat α kertoimet kaavojen (19), (20) ja (27) avulla:

$$\alpha_1 = \left(\frac{35}{38 \text{ MPa}} \right)^{0,7} = 0,94$$

$$\alpha_2 = \left(\frac{35}{38 \text{ MPa}} \right)^{0,2} = 0,98$$

$$\alpha_3 = \left(\frac{35}{38 \text{ MPa}} \right)^{0,5} = 0,96.$$

Lasketaan seuraavaksi palkin muunnettu korkeus kaavalla (21):

$$h_0 = \frac{2 \cdot 220400 \text{ mm}^2}{1540 \text{ mm}} = 286 \text{ mm}$$

missä poikkileikkauksen pinta-ala:

$$A_c = 380 \text{ mm} \cdot 580 \text{ mm} = 220400 \text{ mm}^2$$

ja haihtumiselle altis piiri:

$$u = 2 \cdot 580 \text{ mm} + 380 \text{ mm} = 1540 \text{ mm}.$$

Betonin lieriölujuuden keskiarvo on tässä tapauksessa yli 35 MPa , joten käytetään kaavaa (26) kertoimen β_H ratkaisemiseksi:

$$\beta_H = 1,5[1 + (0,012 \cdot 50)^{18}]286,2\text{mm} + 250 \cdot 0,96 = 669,$$

jonka arvon tuli olla pienempi tai yhtä suuri, kuin

$$1500 \cdot 0,96 = 1440.$$

Lasketaan tämän jälkeen kertoimelle $\beta_c(t, t_0)$ arvo kaavalla (24):

$$\beta_c(18262,14) = \left[\frac{(18262 - 14)}{(669 + 18262 - 14)} \right]^{0,3} = 0,99.$$

Kerroin $\beta(t_0)$ voidaan laskea kuormittumisen alkamisajan hetkellä kaavan (23) kanssa. Kuormittumisen alkamishetki oli 14 vuorokautta, jolloin kertoimen $\beta(t_0)$ arvoksi saadaan:

$$\beta(14) = \frac{1}{0,1 + 14^{0,20}} = 0,56.$$

Lasketaan seuraavaksi betonin lieriölujuudesta riippuva kerroin. Se lasketaan kaavan (22) mukaan:

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{38\text{MPa}}} = 2,73.$$

Koska betonin lieriölujuuden keskiarvo on yli 25 MPa , lasketaan suhteellisen kosteuden huomioiva kerroin, kaavan (18) mukaan. Palkin ympäristön suhteellinen kosteus on 50%, jolloin kertoimen arvoksi saadaan:

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - 50/100}{0,1 \cdot \sqrt[3]{286\text{mm}}} \cdot 0,944 \right] \cdot 0,984 = 1,69.$$

Seuraavaksi määritetään nimellinen virumaluku kaavan (16) mukaan:

$$\varphi_0 = 1,688 \cdot 2,725 \cdot 0,557 = 2,56.$$

Lopuksi saadaan määritettyä palkille virumaluku 50 vuoden tarkasteluhetkellä kaavan (15) kanssa:

$$\varphi(18262,14) = 2,56 \cdot 0,99 = 2,54.$$

Kimmokertoimien suhteet:

Lasketaan seuraavaksi palkille betonin kimmokertoimen keskiarvo kaavalla (31):

$$E_{cm} = 22GPa \cdot \left(\frac{38Mpa}{10MPa}\right)^{0,3} = 32,8GPa$$

sekä betonin tehollinen kimmokerroin, kun otetaan viruma huomioon kaavan (30) mukaisesti:

$$E_{c,eff} = \frac{32,84GPa}{1 + 2,540} = 9,3GPa.$$

Lasketaan kimmokerroin suhteet kaavoilla (41) ja (42):

$$\alpha_{e,eff} = \frac{200GPa}{9,3GPa} = 21,5$$

$$\alpha_e = \frac{200GPa}{32,8GPa} = 6,1.$$

Halkeilun suureita:

Lasketaan palkille halkeamattoman ja lyhytaikaisen tilan puristusvyöhykkeen korkeus kaavalla (3) ja jäyhyysmomentti kaavalla (4):

$$X_{I,LA} = \frac{\frac{380mm \cdot (580mm)^2}{2} + (6,1 - 1)(2454,4mm^2 \cdot 529,5mm + 981,7mm^2 \cdot 50,5mm)}{380mm \cdot 580mm + (6,1 - 1)(2454,4mm^2 + 981,7mm^2)}$$

$$X_{I,LA} = 298mm$$

$$\begin{aligned} I_{I,LA} &= \frac{380mm \cdot (580mm)^3}{12} + 380mm \cdot 580mm \left(\frac{580mm}{2} - 298mm\right)^2 + (6,09 - 1)[2454,4mm^2(529,5mm - 298mm)^2 + 981,7mm^2(50,5mm - 298mm)^2] \\ &= 71,68 \cdot 10^8 mm^4. \end{aligned}$$

Lasketaan sama pitkälle aikavälille:

$$\begin{aligned} X_{I,PA} &= \frac{\frac{380mm \cdot (580mm)^2}{2} + (21,5 - 1)(2454,4mm^2 \cdot 529,5mm + 981,7mm^2 \cdot 50,5mm)}{380mm \cdot 580mm + (21,5 - 1)(2454,4mm^2 + 981,7mm^2)} \\ &= 315mm \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{I,PA} &= \frac{380mm \cdot (580mm)^3}{12} + 380mm \cdot 580mm \left(\frac{580mm}{2} - 315mm \right)^2 + (21,37 - \\
&\quad 1)[2454,4mm^2(529,5mm - 315mm)^2 + 981,7mm^2(50,5mm - \\
&\quad 315mm)^2] \\
&= 100,5 \cdot 10^8 mm^4.
\end{aligned}$$

Lasketaan vielä kaavan (5) mukaan halkeamattoman poikkileikkauksen raudoituksen staattinen momentti lyhyellä ja pitkällä tarkastelu ajalla:

$$\begin{aligned}
S_{I,LA} &= 2454,4mm^2 \cdot (529,5mm - 298mm) + 981,7mm^2 \cdot (50,5mm - \\
&\quad 298mm) = 326759mm^3 \\
S_{I,PA} &= 2454,4mm^2 \cdot (529,5mm - 314,8mm) + 981,7mm^2 \cdot (50,5mm - \\
&\quad 314,8mm) = 267167mm^3.
\end{aligned}$$

Lasketaan palkille täysin halkeilleen ja lyhytaikaisen tilan puristusvyöhykkeen korkeus kaavalla (8) ja jäyhyysmomentti kaavalla (11):

$$\begin{aligned}
X_{II,LA} &= \frac{1}{380mm} \{ [(6,1 \cdot 2454,4mm^2 + (6,1 - 1)981,7mm^2)^2 + 2 \cdot \\
&\quad 380mm(6,1 \cdot 529,5mm \cdot 2454,4mm^2 + (6,1 - 1)529,5mm \cdot \\
&\quad 981,7mm^2)]^{0,5} - (6,1 \cdot 2454,4mm^2 + (6,1 - 1)981,7mm^2) \} \\
&= 189mm \\
I_{II,LA} &= \frac{380mm \cdot (189mm)^3}{3} + 6,1 \cdot 2454,4mm^2(529,5mm - 189mm)^2 + \\
&\quad (6,1 - 1)981,7mm^2(50,5mm - 189mm)^2 = 26,84 \cdot 10^8 mm^4.
\end{aligned}$$

Lasketaan samat pitkälle aikavälille:

$$\begin{aligned}
X_{II,PA} &= \frac{1}{380mm} \{ [(21,5 \cdot 2454,4mm^2 + (21,5 - 1)981,7mm^2)^2 + 2 \cdot \\
&\quad 380mm(21,5 \cdot 529,5mm \cdot 2454,4mm^2 + (21,5 - 1)529,5mm \cdot \\
&\quad 981,7mm^2)]^{0,5} - (21,5 \cdot 2454,4mm^2 + (21,5 - 1)981,7mm^2) \} \\
&= 298mm \\
I_{II,PA} &= \frac{380mm \cdot (298mm)^3}{3} + 21,5 \cdot 2454,4mm^2(529,5mm - 298mm)^2 + \\
&\quad (21,5 - 1)981,7mm^2(50,5mm - 298mm)^2 = 74,22 \cdot 10^8 mm^4.
\end{aligned}$$

Lasketaan vielä täysin halkeilleen poikkileikkauksen raudoituksen staattiset momentit molemmille tarkastelu hetkille kaavalla (12):

$$\begin{aligned}
S_{II,LA} &= 2454,4mm^2(529,5mm - 189mm) + 981,7mm^2(50,5mm - \\
&\quad 189mm) = 699557mm^3
\end{aligned}$$

$$S_{II,PA} = 2454,4\text{mm}^2(529,5\text{mm} - 298\text{mm}) + 981,7\text{mm}^2(50,5\text{mm} - 298\text{mm}) = 324671\text{mm}^3.$$

Kuormien määrittäminen:

Lasketaan aluksi pysyvästä kuormasta aiheutuva momentti palkin keskialueella:

$$M_{gk} = \frac{45\text{kN/m} \cdot (5\text{m})^2}{8} = 140,6\text{kNm}$$

ja vastaavasti muuttuvasta kuormasta aiheutuva momentti:

$$M_{qk} = \frac{30\text{kN/m} \cdot (5\text{m})^2}{8} = 93,8\text{kNm}.$$

Lasketaan ominaiskuormien yhdistelmä:

$$M_{Ek} = 140,6\text{kNm} + 93,8\text{kNm} = 234,4\text{kNm}$$

sekä pitkäaikaisten kuormien yhdistelmä:

$$M_{Eqp} = 140,6\text{kNm} + 93,8\text{kNm} \cdot 0,3 = 168,8\text{kNm}.$$

Halkeilukestävyyden määrittäminen:

Lasketaan palkin halkeilumomentti yhdistämällä kaavat (1) ja (2):

$$M_{cr} = 2,9\text{MPa} \cdot \frac{71,68 \cdot 10^8\text{mm}^4}{580\text{mm} - 298\text{mm}} = 73,6\text{kNm}$$

Koska $M_{Ek} > M_{cr}$, palkki halkeaa. Lasketaan vielä palkille halkeiluaste kaavan (7) mukaan:

$$\zeta = 1 - 0,5 \left(\frac{73,6\text{kNm}}{234,4\text{kNm}} \right)^2 = 0,95.$$

Laskussa käytetään β arvona 0,5, koska kuormitus on pitkäaikaista ja toistuvaa.

Kuorman aiheuttama taipuma:

Lasketaan halkeamattoman tilan kaarevuus lyhyellä ja pitkällä tarkasteluvälillä kaavalla (6):

$$\frac{1}{r_{I,LA}} = \frac{0,1688\text{MNm}}{32800\text{MN/m}^2 \cdot 0,007168\text{m}^4} = 0,0007 \frac{1}{\text{m}}$$

$$\frac{1}{r_{I,PA}} = \frac{0,1688MNm}{9400 \frac{MN}{m^2} \cdot 0,01005m^4} = 0,0018 \frac{1}{m}$$

Seuraavaksi lasketaan täysin haljenneen tilan kaarevuus kaavalla (13):

$$\frac{1}{r_{II,LA}} = \frac{0,1688MNm}{32800 \frac{MN}{m^2} \cdot 0,002684m^4} = 0,0019 \frac{1}{m}$$

$$\frac{1}{r_{II,PA}} = \frac{0,1688MNm}{9400 \frac{MN}{m^2} \cdot 0,007422m^4} = 0,0024 \frac{1}{m}.$$

Lasketaan osittain haljenneen poikkileikkauksen kaarevuus lyhyellä sekä pitkällä aikavälillä kaavalla (14):

$$\frac{1}{r_{LA}} = 0,95 \cdot 0,0019 \frac{1}{m} + (1 - 0,95) \cdot 0,0007 \frac{1}{m} = 0,0019 \frac{1}{m}$$

$$\frac{1}{r_{PA}} = 0,95 \cdot 0,0024 \frac{1}{m} + (1 - 0,95) \cdot 0,0018 \frac{1}{m} = 0,0024 \frac{1}{m}.$$

Lasketaan kuormituksesta johtuva taipuma kaavalla (44) molemmille aikaväleille. Taipumakertoimelle K saadaan taulukosta 4 arvoksi $\frac{5}{48}$, jolloin taipumaksi saadaan:

$$a_{M,LA} = \frac{5}{48} \cdot (5m)^2 \cdot 0,0019 \frac{1}{m} = 0,004846m = 4,8mm$$

$$a_{M,PA} = \frac{5}{48} \cdot (5m)^2 \cdot 0,0024 \frac{1}{m} = 0,006286m = 6,3mm.$$

Sisäisen kutistuman määrittäminen

Määritetään betonin puristuslujuuden ominaisarvosta riippuva $\varepsilon_{ca}(\infty)$ kaavalla (36):

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot (30MPa - 10) \cdot 10^{-6} = 5 \cdot 10^{-5}.$$

Seuraavaksi määritetään ajasta riippuva kerroin $\beta_{as}(t)$ kaavalla (37) molemmille tarkasteluhetkille:

$$\beta_{as}(14) = 1 - e^{-0,2 \cdot 14^{0,5}} = 0,53$$

$$\beta_{as}(18262) = 1 - e^{-0,2 \cdot 18262^{0,5}} = 1,0.$$

Tämän jälkeen voidaan määrittää sisäisen kutistuman arvot molemmille tarkasteluhetkille kaavan (35) avulla:

$$\varepsilon_{ca}(14) = 0,527 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 2,6 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_{ca}(19262) = 1,000 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 5,0 \cdot 10^{-5}.$$

Kuivumiskutistuman määrittäminen:

Seuraavaksi tulee määrittää ympäristön suhteellisesta kosteudesta riippuvan kertoimen β_{RH} arvot. Aikaisemmin todettiin, että palkin ympäristön suhteellinen kosteus on 50%. Kertoimen arvo lasketaan kaavalla (34):

$$\beta_{RH} = 1,55 \left[1 - \left(\frac{50}{100} \right)^3 \right] = 1,36.$$

Lasketaan palkin nimellinen kuivumiskutistuma kaavan (33) kanssa. Kertoimien α_{ds1} ja α_{ds} arvot luetaan taulukosta 3. Nimellisen kuivumiskutistuman arvoksi saadaan:

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \left[(220 + 110 \cdot 4) \cdot e^{-0,12 \cdot \frac{38MPa}{10MPa}} \right] \cdot 10^{-6} \cdot 1,36 = 4,8 \cdot 10^{-4}$$

Vielä tulee määrittää tarkasteluhetkestä riippuva kerroin $\beta_{ds}(t, t_s)$. Betonipalkin jälkihoito kestää viisi vuorokautta, jota käytetään kuivumiskutistuman alkamishetken t_s arvona. Lasketaan kertoimen arvot molemmille tarkasteluhetkille kaavalla (32):

$$\beta_{ds}(14,5) = \frac{(14 - 5)}{(14 - 5) + 0,04 \cdot \sqrt{(286mm)^3}} = 0,04$$

$$\beta_{ds}(18262,5) = \frac{(18262 - 5)}{(18262 - 5) + 0,04 \cdot \sqrt{(286mm)^3}} = 0,99$$

Tämän jälkeen voidaan määrittää kuivumiskutistuman arvot. Kertoimelle k_h saadaan arvo interpoloimalla taulukon 2 arvojen väliltä. Kuivumiskutistumien laskenta suoritetaan kaavalla (31):

$$\varepsilon_{cd}(14) = 0,04 \cdot 0,76 \cdot 4,8 \cdot 10^{-4} = 1,6 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_{cd}(18262) = 0,99 \cdot 0,76 \cdot 4,8 \cdot 10^{-4} = 3,6 \cdot 10^{-4}.$$

Kokonaiskutistumat:

Kokonaiskutistumat saadaan summaamalla kuivumiskutistuma ja sisäinen kutistuma yhteen kaavan (30) mukaisesti:

$$\varepsilon_{cs}(14) = 1,6 \cdot 10^{-5} + 2,6 \cdot 10^{-5} = 4,3 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_{cs}(9125) = 3,6 \cdot 10^{-4} + 0,5 \cdot 10^{-4} = 4,1 \cdot 10^{-4}.$$

Kutistuman aiheuttama taipuma:

Lasketaan aluksi raudoituksen staattisen momentin ja palkin jäyhyysmomentin suhteet molemmille tarkasteluhetkille kaavalla (43):

$$\frac{S}{I_{LA}} = 0,95 \cdot \frac{699557 \text{ mm}^3}{2,684 \cdot 10^9 \text{ mm}^4} + (1 - 0,95) \frac{326759 \text{ mm}^3}{7,168 \cdot 10^9 \text{ mm}^4} = 2,5 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{mm}}$$

$$\frac{S}{I_{PA}} = 0,95 \cdot \frac{324671 \text{ mm}^3}{7,422 \cdot 10^9 \text{ mm}^4} + (1 - 0,95) \frac{267167 \text{ mm}^3}{1,005 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4} = 4,3 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{mm}}$$

Tämän jälkeen lasketaan kutistumasta johtuvat kaarevuudet kaavalla (38):

$$\frac{1}{r_{CS,LA}} = 4,3 \cdot 10^{-5} \cdot 6,09 \cdot 2,5 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{mm}} = 6,5 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{m}}$$

$$\frac{1}{r_{CS,PA}} = 4,1 \cdot 10^{-4} \cdot 21,37 \cdot 4,3 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{mm}} = 3,8 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{m}}$$

Lopuksi voidaan laskea kutistumasta johtuvat taipumat kaavan (42) mukaisesti:

$$a_{CS,LA} = 0,125 \cdot (5\text{m})^2 \cdot 6,5 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{m}} = 2,0 \cdot 10^{-4} \text{m} = 0,2\text{mm}$$

$$a_{CS,PA} = 0,125 \cdot (5\text{m})^2 \cdot 3,8 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{m}} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{m} = 1,2\text{mm}$$

Kokonaistaipumat:

Kokonaistaipumat saadaan molemmille tarkasteluhetkille summaamalla kuormituksesta johtuva taipuma yhteen kutistumasta johtuvan taipuman kanssa, kaavan (47) mukaisesti:

$$a_{kok,LA} = 4,8\text{mm} + 0,2\text{mm} = 5,0\text{mm}$$

$$a_{kok,PA} = 6,3\text{mm} + 1,2\text{mm} = 7,5\text{mm}.$$

4.2 Herkkyystarkastelu

Tässä osiossa tutkitaan eri lähtötietojen vaikutusta taipuman suuruuteen. Laskentaa varten on luotu Excel-laskentapohja, jonka avulla taipuman arvot lasketaan eri tapauksille ja näistä saatuja arvoja verrataan edellisen esimerkin tulokseen. Edellisen esimerkin lähtöarvot ja tulokset on vielä koottu taulukkoon 5.

Taulukko 5. *Taipuman vertailuarvot.*

Lähtötiedot		
Korkeus h:	580	mm
Leveys b:	380	mm
Jännemitta L:	5	m
Suojabetoni c:	30	mm
Betonin lujuusluokka:	C30/37	
Vetorausdoitus ϕ :	25	mm
Määrä:	5	kpl
Puristusraudoitus ϕ :	25	mm
Määrä:	2	kpl
Haat ϕ :	8	mm
Suht. Kosteus RH:	50	%
Tarkasteluhetki t:	18250	vrk
Pysyvä kuorma g_k :	45	kN/m
muuttuva q_k :	30	kN/m
Muuttuvan kuorman pysyvä osuus ψ	0,3	
Taipumat		
Kuorman aiheuttama taipuma	6,29	mm
Kutistuman aiheuttama taipuma	1,20	mm
Kokonaistaipuma	7,49	mm

Taulukkoon 6 on koottu herkkiystarkastelussa saadut tulokset. Ensimmäisessä sarakkeessa on ilmoitettu muutettu suure, toisessa sarakkeessa on muutetun suureen arvo ja lopuissa sarakkeissa on muutetulla suurella saatuja taipuman arvoja. Herkkiystarkastelussa taipumaa on tarkasteltu 50 vuoden tarkasteluhetkellä.

Taulukko 6. *Taipumien arvot muutetuilla lähtöarvoilla.*

Muutettu suure	Uusi arvo	Kuorman aiheuttama taipuma	Kutistuman aiheuttama taipuma	Kokonaistaipuma
Korkeus	680 mm	4,18 mm	1,06 mm	5,24 mm
	480 mm	10,27 mm	1,34 mm	11,62 mm
Leveys	480 mm	5,89 mm	1,34 mm	7,22 mm
	280 mm	6,81 mm	0,96 mm	7,77 mm
Jännemitta	7000 mm	24,41 mm	2,38 mm	26,79 mm
	3000 mm	0,74 mm	0,37 mm	1,12 mm
Suojabetoni	40 mm	6,66 mm	1,26 mm	7,92 mm
	20 mm	5,95 mm	1,14 mm	7,09 mm
Betonin lujuusluokka	C40/50	5,94 mm	1,32 mm	7,26 mm
	C20/25	6,65 mm	1,03 mm	7,68 mm
Sementtityyppi	S	6,29 mm	0,99 mm	7,28 mm
	R	6,29 mm	1,60 mm	7,89 mm
Ilman puristusraudoitusta	-	7,71 mm	2,88 mm	10,59 mm
Vetorausdoitus	4T25	7,12 mm	1,05 mm	8,17 mm
	6T25	5,71 mm	1,31 mm	7,01 mm

Herkkiystarkastelussa saatuja tuloksia on käsitelty tarkemmin seuraavassa luvussa.

5. TULOKSET

5.1 Pitkä- ja lyhytaikaisten tulosten vertailu

Ensimmäisen laskentaesimerkin pohjalta voidaan vertailla pitkä- ja lyhytaikaisten tulosten eroja. Esimerkissä taipuma laskettiin 2 viikon ja 50 vuoden tarkasteluhetkillä. Molemmissa tarkastelutavoissa laskentatapa on vähän erilainen ja siihen vaikuttavat eri tekijät, minkä vuoksi tulokset myös eroavat toisistaan.

Laskun pohjalta voidaan huomata, että pitkällä tarkasteluajalla taipuman arvoon ehtivät vaikuttamaan kaikki tekijät. Betonissa kutistuminen ehtii tapahtua melkein kokonaan ja betonin viruminen tulee huomioida laskennassa. Betonin kutistuminen ja viruma molemmat lisäävät palkin taipuman arvoa. Tässä laskentaesimerkissä kutistuminen kasvattaa taipumaa pitkällä aikavälillä jopa 500% eli 1,0mm lyhyempään tarkasteluhetkeen verrattuna. Viruma vaikuttaa betonin kimmokertoimen kautta palkin poikkileikkauksen puristusvyöhykkeen korkeuteen kasvattamalla tätä, ja näin kasvattaa myös palkin kuormituksesta johtuvaa taipuman arvoa. Lyhyemmällä tarkasteluhetkellä kuormituksesta aiheutuvan taipuman arvo on 4,8mm ja pidemmällä tarkasteluhetkellä taipuman arvoksi saadaan 6,3mm. Näin ollen voidaan todeta, että kyseisessä laskentaesimerkissä pitkällä aikavälillä viruma kasvatti kuormituksesta johtuvaa taipuman arvoa 30%.

Lyhyellä tarkasteluajalla puolestaan taipuman arvoksi saadaan pienempi luku. Sisäinen kutistuma ei ehdi tapahtua kokonaan, ja sen arvo on noin puolet pitkään tarkasteluun verrattuna. Betonin kuivumiskutistuma puolestaan on huomattavan paljon pienempi lyhyellä tarkasteluajalla, vain noin 5% pitkään verrattuna. Lyhyellä tarkasteluajalla betonin virumaa ei ehdi myöskään tapahtua, jonka vuoksi sitä ei huomioida ollenkaan ja näin ollen taipuma on myös sen osalta pienempi.

5.2 Eri tekijöiden vaikutukset

Luvun 4.2 herkkyystarkastelussa testattiin palkin rakenteellisten ominaisuuksien vaikutusta palkin taipuman arvoon. Tätä testattiin muuttamalla palkin korkeuden, leveyden jännevälin, suojabetonin paksuuden, betonin lujuusluokan, sementtityypin ja raudoituksen arvoja ja tämän jälkeen laskettiin taipuman arvon uudelleen.

Kuten taulukosta 6 huomataan, taipuman arvoon vaikuttavat eniten palkin mitat. Suurin vaikutus laskentojen perusteella on palkin korkeudella ja jännevälillä. Tämä oli odotettavissa, sillä rakenteen jännemitan ja tehollisen korkeuden suhteen muuttaminen todettiin jo aiemmin yhtenä tärkeimpänä taipuman rajoittamiskeinona. Palkin poikkileikkauksen leveyden muutoksilla ei ole merkittäviä vaikutuksia kokonaistaipuman arvoon. Kasvattamalla palkin leveyttä, kasvaa myös kutistumasta johtuva taipuma, mutta samalla pienenee

kuormituksesta johtuva taipuma. Päinvastoin tapahtuu pienentämällä palkin leveyttä. Kokonaistaipuman arvo näiden molempien muutoksien jälkeen pysyy lähes samana, mutta kuitenkin taulukon 6 tuloksista voidaan todeta palkin leveyden kasvattamisen pienentävän kokonaistaipuman arvoa vähän.

Betonin ominaisuuksista palkin suojabetonin paksuuden, betonin lujuusluokan ja sementtityypin muutoksen eivät aiheuttaneet kovin suuria muutoksia taipuman arvossa. Betoni-
peitteen paksuutta muuttamalla huomataan, että mitä pienempi betonipeite on, sitä pienempi on myös taipuman arvo. Lujuusluokaltaan suurempaa betonia käyttämällä saadaan kuormituksesta johtuvaa taipumaa rajoitettua, mutta kutistumasta aiheutuvaa taipumaa se kasvattaa. Kokonaistaipuman kannalta, mitä lujempaa betonia käytetään, sen pienempi on kokonaistaipuma. Sementtityypin vaihtamisella nähdään ainoastaan muutos kutistuman aiheuttamassa taipumassa. Saaduista tuloksista voidaan todeta, että mitä nopeammin kovettuvaa sementtiä käytetään, sitä suurempi on kutistumasta johtuva taipuma.

Palkin raudoitusten muutoksilla voidaan todeta, että raudoituksen määrän kasvattaminen poikkileikkauksessa pienentää kuormituksesta johtuvaa taipumaa. Raudoituksen muutokset vaikuttavat myös kutistuman aiheuttamaan taipumaan, mutta eivät aivan yhtä yksiselitteisesti. Poistamalla palkin yläpinnan puristusraudoitus tai kasvattamalla vetoraudoituksen määrää puristusraudoitukseen nähden, huomataan kutistuman aiheuttaman taipuman kasvavan. Puolestaan vähentämällä alapinnan vetoraudoitusta, vähenee myös taipuman arvo. Tämä johtuu siitä, että palkin ylä- ja alapinnan raudoituksen epäsymmetrisyys kasvaa. Epäsymmetrinen raudoitus on syynä miksi betonin kutistuma aiheuttaa betonirakenteissa taipumaa rajoittamalla betonin kutistumista raudoituksen kohdalla (BY211 2013, s. 233).

6. YHTEENVETO

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli tutkia, kuinka yksiaukkoisen suorakaidepoikkileikkauksellisen palkin taipuman arvo voidaan laskennallisesti määrittää ja kuinka sitä voidaan rajoittaa. Tutkimuksessa huomattiin, että palkin rakenteellisten ominaisuuksien lisäksi materiaaliominaisuuksilla, kuten betonin virumalla ja kutistumalla on suuri vaikutus palkin taipumaan. Nämä molemmat vaikuttavat pääasiassa vasta pidemmän ajan jälkeen, jolloin ne pääasiassa kasvattavat taipuman arvoa.

Betonille on siis ominaista kutistuminen ja viruminen. Betonin kuivuminen tapahtuu sekä heti valun yhteydessä, että pidemmän ajan jälkeen betonin kuivuessa. Kutistuma aiheuttaa palkissa kaarevuutta, mikäli poikkileikkaus on epäsymmetrisesti raudoitettu. Kutistuma aiheuttaa myös halkeiluriskiä, mikä edesauttaa taipuman kasvua. Viruma puolestaan on betonirakenteissa kuormituksesta johtuvaa muodonmuutosta ja se vaatii aikaa esiintyäkseen. Laskennassa viruma huomioidaan määrittämällä virumaluku, jonka avulla pienennetään betonin kimmokertoimen arvoa. Tätä kautta se kasvattaa poikkileikkauksen puristusvyöhykkeen korkeutta ja kasvattaa taipuman arvoa.

Betonille on myös ominaista pieni vetolujuus. Kun rakenteen vetojännitys ylittää betonin vetolujuuden, esiintyy rakenteessa halkeilua. Mahdollinen halkeilu huomioidaan taipuman laskennassa tarkastelemalla palkkia haljenneessa sekä halkeamattomassa tilassa. Palkin kaarevuudet määritetään, kun poikkileikkaus ei ole vielä halkeillut ja kun poikkileikkaus on täysin halkeillut. Tämän jälkeen määritetään palkin halkeiluaste, jonka avulla palkin kaarevuuden arvo interpoloidaan halkeamattoman ja täysin halkeilleen poikkileikkauksien kaarevuuksien välillä.

Mikäli palkki taipuu liikaa, tulee sen taipumaa rajoittaa. Palkin vaakatason alapuolista taipumaa voidaan tehokkaimmin rajoittaa esikorrotaamalla palkkia, jolloin lopputilanteessa kuormitus suoristaa palkkia. Rajoituskeinona voidaan myös käyttää lisäämällä palkkiin puristusraudoitus, jolloin poikkileikkauksen raudoitus on symmetrisempi. Tämä pienentää kutistuman aiheuttamaa kaarevuutta. Muita rajoituskeinoja ovat oikean betonimassan valinta, valun jälkeen hyvä jälkihoito sekä muottien tukirakenteiden poistaminen mahdollisimman myöhään.

Laskentaesimerkkien avulla huomattiin, että taipuman tarkasteluhetkellä on suuri vaikutus taipuman arvoon. Pitkällä aikavälillä betonissa kutistuma ja viruma ehtivät täysin kehittyä ja kasvattavat taipumaa. Palkin rakenteellisista ominaisuuksista suurin vaikutus oli palkin mitoilla. Jännemitan ja palkin tehollisen korkeuden suhdetta pienentämällä saadaan pienennettyä taipumaa. Pieniä vaikutuksia huomattiin myös muuttamalla poikkileikkauksen raudoitusta, betonipeitteen paksuutta, betonin lujuusluokkaa ja sementtityyppiä.

LÄHTEET

Betoniteollisuus (2018a). Betonin ominaisuudet ja käyttö. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 27.10.2018): <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennus-materiaalina/betonin-ominaisuudet-ja-kaytto/>.

Betoniteollisuus (2018b). Betonin lujuus. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 19.10.2018): <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/ominaisuudet-ja-edut/betonin-lujuus/>.

Betoniteollisuus (2018c). Jälkihoito. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 5.11.2018): <https://betoni.com/koti-betonista/rakennustapavaihtoehtot/paikallavalu/jalkihoito/>.

BY202 (1986). Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja. Osa 1. Suomen Betoniyhdistys.

BY211 (2013). Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja. Osa 1. Suomen Betoniyhdistys.

Rakennustuoteteollisuus RTT ry (2012). Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodin mukaan. Osa 8: Taipuma. Saatavissa (viitattu 2.11.2018): www.eurocodes.fi/1992/paasisivu1992/sahkoinen1992/Leaflet_8_Taipuma.pdf.

SFS-EN 1992-1-1 (2015). Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suomen standardisoimisliitto.